

DOI: 10.11779/CJGE2023S20010

不同循环加载模式下改性铁尾矿砂的变形特性研究

姜屏^{1,2}, 王智超^{1,2}, 肖景平³, 王伟^{*1,2}, 李娜^{1,2}, 陈业文^{1,2}, 吴二鲁^{1,2}

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴市软土地基与建筑结构协同作用重点实验室, 浙江 绍兴 312000;
3. 华汇工程设计集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 利用聚丙烯纤维和水泥改性铁尾矿砂, 并将其应用于路基工程是实现铁尾矿资源化利用的有效手段。通过动三轴试验探究了不同循环加载模式下纤维掺量、动静比和龄期对纤维水泥改性铁尾矿砂(FCIT)变形特性的影响。研究结果表明: ①间歇加载和逐级加载下FCIT的变形行为在7 d龄期时处于塑性安定和塑性蠕变状态; ②对比持续加载和间歇加载变形情况, 发现间歇加载下FCIT的累积应变(ε_p)变化幅度总体上小于持续加载作用引起的 ε_p 变化幅度; ③逐级加载下FCIT的累积应变被赋予倍数系数后, 可较好预测持续加载下的累积应变。修正后的累积应变满足幂函数和线性函数组成的预测公式。

关键词: 路基工程; 铁尾矿; 间歇加载; 逐级加载; 变形特性

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)S2-0104-06

作者简介: 姜屏(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土动力学等方面的研究工作。E-mail: jiangping@usx.edu.cn。

Deformation characteristics of modified iron tailings under different cyclic loading modes

JIANG Ping^{1,2}, WANG Zhichao^{1,2}, XIAO Jingping³, WANG Wei^{1,2}, LI Na^{1,2}, CHEN Yewen^{1,2}, WU Erlu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Shaoxing Key Laboratory of Interaction between Soft Soil Foundation and Building Structure, Shaoxing 312000, China; 3. Huahui Engineering Design Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: Using polypropylene fiber and cement to modify iron tailings, the effects of fiber content, dynamic-static ratio and curing age on the deformation characteristics of the fiber cement-modified iron tailing (FCIT) under different cyclic loading modes are explored through the dynamic triaxial tests. The research results show that: (1) The deformation behaviors of FCIT under intermittent loading and progressive loading are in the state of plastic stability and plastic creep at curing age of 7 d. (2) By comparing the deformations of continuous loading and intermittent loading, it is found that the variation range of the cumulative strain (ε_p) of FCIT under intermittent loading is generally smaller than that of ε_p caused by continuous loading. (3) Assigning a multiple factor to the cumulative strain of FCIT under progressive loading improves predictions for the cumulative strain under continuous loading. The corrected cumulative strain satisfies the prediction formula composed of power function and linear function.

Key words: roadbed engineering; iron tailings; intermittent loading; progressive loading; deformation characteristic

0 引言

铁尾矿为铁矿选矿后的废渣, 是工业废渣的主要组成部分。对于尾矿的整体利用, 部分学者研究尾矿砂用作路基材料的可行性, 探讨了尾矿砂作为路基填料的力学特性, 发现尾矿砂经过改性后可以作为路基填料^[1-2]。目前将铁尾矿砂作为路基填料的研究主要侧重于利用材料改性铁尾矿, 并分析其基本力学性能, 主要从抗压强度^[3-4]、抗剪强度^[5-6]、抗弯性能^[7-8]、收缩性能^[9-10]等基本静力性能方面进行, 而路基填料常受到动态荷载的作用。因此, 分析改性铁尾矿砂作为路基材料的可行性需要从动力学角度进行分析。

路基填料所受的动荷载类型为交通荷载, 该荷载作为一种特殊的循环荷载, 既不同于静荷载也不同于地震荷载。交通荷载可分为持续加载、间歇加载、逐级加载等加载方式。持续加载试验一般以长周期循环为主, 被用来研究长期循环荷载下改性土的孔隙压力、临界动应力、累积应变等^[11-12], 以模拟地铁、铁路等环境的交通荷载作用下改性土的沉降和变形^[13-14]。实

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179107); 浙江省自然科学基金项目(LQ20E080005)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者(E-mail: wellswang@usx.edu.cn)

际上, 交通荷载具有一定的间歇性。为此, 不少学者开展了持续加载和间歇加载条件下的动三轴试验, 对比两者加载条件下的变形规律, 并分析停振阶段对改性土动力特性的影响^[15-16]。结果表明^[17-19], 两种加载条件下累积应变的变化规律相似, 但是间歇加载的存在对改性土的变形有减缓作用。停振期的存在会使后续振动阶段的累积应变增长缓慢, 且改性土的动弹模变化出现明显的停滞和拐点。逐级加载即分级加载, 指当某一级动应力幅值加载振次达到设定要求后, 在同一个试样上直接改变动应力幅值施加下一级动应力荷载。逐级加载考虑了填料应力历史的影响, 且节省时间、材料和工作量。逐级加载试验主要被用来分析改性土的区骨干曲线、动强度、破坏特性以及变形行为, 以此研究改性土在逐级加载条件下的动力特性^[20]。因此, 同时研究不同循环加载模式下改性铁尾矿的动力特性对将其应用于路基具有重要意义。

综上所述, 利用加筋材料和固化剂可在一定程度上改善铁尾矿砂的工程特性, 使其成为性能良好的路基填料。通过动力试验研究不同循环加载模式下改性铁尾矿砂的变形特性, 有望为改性铁尾矿砂在路基工程中的应用提供理论依据。因此本文利用聚丙烯纤维和水泥改性铁尾矿砂, 并通过动三轴试验探究不同循环加载模式下改性铁尾矿砂的变形特性, 试验结果可为 FCIT 应用于预防路基沉降和延缓路基变形提供参考。

1 试验材料与制备

1.1 试验材料与试样制作

试验所用材料为铁尾矿、水泥、聚丙烯纤维和自来水。含水率为 30%, 水泥掺量为 10%, 聚丙烯纤维掺量为 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%。

动三轴试样直径 39.1 mm、高 80 mm。根据配合比称取相应质量的铁尾矿砂、水泥、聚丙烯纤维和自来水。将铁尾矿砂、水泥和聚丙烯纤维混合用搅拌机低速搅拌, 然后分两次倒入事先组装好的模具中。再

用保鲜膜覆盖模具表面, 静置 1 h, 将带有模具的试样放入温度为 20℃±2℃, 湿度为 95%的标准养护室, 养护 7 d。

1.2 试验方案

本文主要通过动三轴试验, 研究模拟持续加载、间歇加载和逐级加载作用下 FCIT 的变形特性。持续加载作为对照组, 模拟在 50 min 时间段内(振动次数为 1500 次)车辆在道路上行驶过程中 FCIT 路基的沉降情况。间歇加载模拟在较少车流量或夜间车辆行驶时改性铁尾矿路基在循环荷载下的变形规律。逐级加载模拟的是在 50 min 时间段内逐次增大车辆荷载对改性铁尾矿路基的变形影响。试验采用应力控制的加载方式, 在 100 kPa 围压和 0.5 Hz 条件下使用正弦波对试样进行加载。试验加载模式分为 A、B、C 3 组, 其中 A 组作为对照组, B 和 C 组作为主要数据分析组, 如表 1。

2 间歇加载下 FCIT 的变形特性

2.1 累积应变规律

为研究间歇加载下 FCIT 的累积应变情况, 首先分析对照组在持续加载下 FCIT 的累积塑性应变规律, 如图 1。可以发现所有累积应变随振动次数的增加而逐渐增大。当纤维掺量一定时, 随着动静比的增大, 各纤维掺量下改性铁尾矿的累积应变逐渐增加。但对于掺有纤维的改性铁尾矿而言, 虽然 $R_{cr}=0.3$ 的阶段下的动应力较大, 但其 ε_{1500} 未达到 3%, 甚至当 W_f 为 0.75% 和 1% 时, ε_{1500} 未达到 1.5%。说明纤维的掺入可以有效抵抗试样的变形, 尤其是纤维掺量的增加, 增强了纤维对试样的抗拉作用, 从而提高了 FCIT 的抗变形能力。

图 2 展示了间歇加载下 FCIT 的累积应变随振动次数的变化情况。在不同纤维掺量和动静比作用下, FCIT 的累积应变随振动次数的变化较为相似。随着阶段次数的增多, 累积应变的增加速度逐渐变缓。

随着动静比的增加, 每阶段的累积应变随之增加。

表 1 不同加载模式下 FCIT 试验方案

Table 1 FCIT test schemes under different loading modes

组号	纤维掺量	动静比 R_{cr}	围压/ kPa	频率/ Hz	加载模式	加载时间
A					持续加载	持续加载 50 min
B	0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1%	0.1, 0.2, 0.3	100	0.5	间歇加载	加载 5 min、停振 5 min 共 50 min
C					逐级加载	依次加载三级, 共 50 min

纤维掺量的不同也会改变 FCIT 的累积应变。根据图 2 不同循环加载模式下改性铁尾矿砂的变形特性研究纵坐标的对比发现, 纤维掺量的增多可有效降低 FCIT 的累积应变。这一结果与持续加载下 FCIT 的变化规律一致。而且由于间歇加载的特殊性, 间歇的存在使得试样在受力后会有一定的回弹, 因此可在一定程度上延缓试样变形。

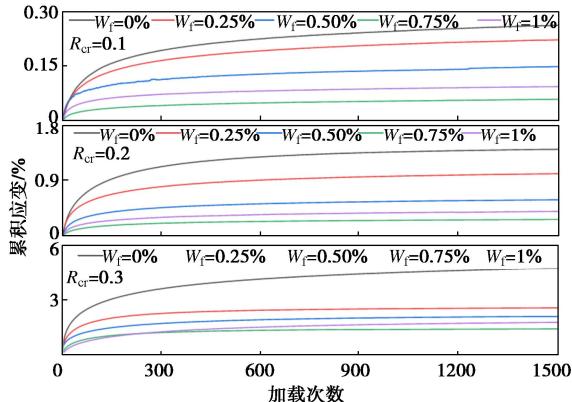


图 1 FCIT 累积应变随振动次数的变化曲线

Fig. 1 Variation curves of cumulative strain of FCIT with vibration times

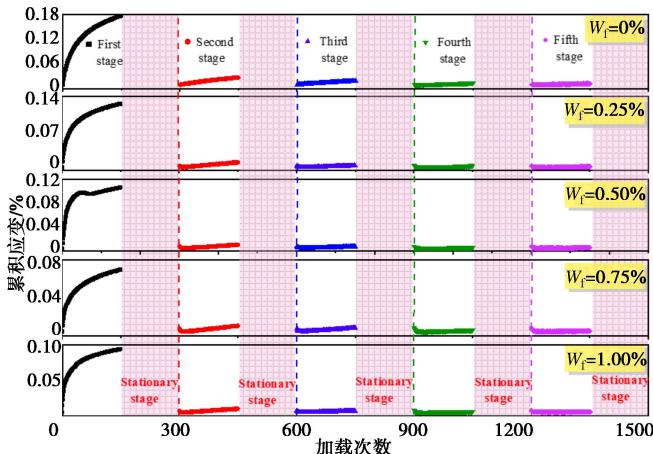


图 2 间歇加载阶段累积应变图 ($R_{cr}=0.1$)

Fig. 2 Cumulative strains at intermittent loading stage (7 d, $R_{cr}=0.1$)

2.2 变形行为划分

根据安定理论, 循环荷载作用下改性土的变形状态可分为塑性安定、塑性蠕变和增量破坏 3 个典型变形评价准则^[21-23]。根据累积应变 ε_p 和累积应变速率 $\dot{\varepsilon}_p$ 可将 FCIT 的永久变形行为进行定量划分^[24-25]。前期研究表明^[12], FCIT 的 $\dot{\varepsilon}_p$ 衰减趋向于 0 且 $\varepsilon_p \leq 1\%$ 为塑性安定, $\dot{\varepsilon}_p$ 随 ε_p 的增加逐渐下降且累积应变范围在 $1\% \leq \varepsilon_p \leq 4\%$, 但在大量振动次数下产生较大累积变形甚至破坏的为塑性蠕变, $\varepsilon_p \geq 4\%$ 时 $\dot{\varepsilon}_p$ 处于较高水平且 ε_p 到达破坏标准为增量破坏。

图 3 为间歇加载下 FCIT 的变形行为划分。红色、蓝色、绿色曲线为不同 R_{cr} 、不同纤维掺量下累积应变

与累积应变速率的关系曲线。在不同 R_{cr} 下 FCIT 的变形行为从塑性安定过渡为塑性蠕变, 这是因为动静比的增加, 增大了 FCIT 的变形程度。

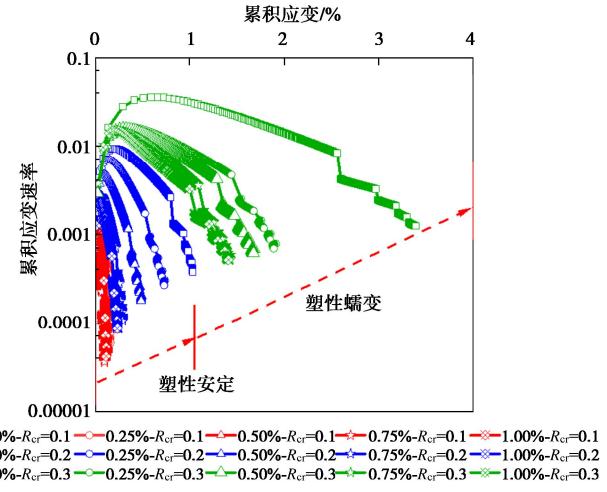


图 3 变形行为划分

Fig. 3 Division of deformation behavior

3 逐级加载下 FCIT 的变形特性

3.1 变形行为判定

逐级加载下 FCIT 的累积应变随振动次数的变化趋势如图 4 所示。从图 4 中可以发现, 在初始较小动应力下试样逐渐被压实, 随着动应力的增加, 累积应变速率增加, 累积应变不断上升。逐级加载下, 不同纤维掺量下 FCIT 的累积应变随振动次数的变化规律有一定差别。

从图 4 中可以看出, 第三级加载下 $W_f=0\%$ 时 FCIT 的累积应变接近 4%, $W_f=0.25\%$ 时 FCIT 的累积应变接近 2.5%, $W_f=0.50\%$ 时 FCIT 的累积应变 2%。此时 $W_f=0.75\%$ 和 1% 时 FCIT 的累积应变较为相近, 都接近 1.5%。从整体趋势来看, 在逐级加载作用下, $W_f=0\%$ 时受到累积变形较大, 其次 $W_f=0.25\%$ 时的 FCIT, $W_f=0.75\%$ 和 1% 时 FCIT 累积变形最小。纤维的掺入可在一定程度上增强 FCIT 抵抗变形的能力, 且当 $W_f=0.75\%$ 时为最优掺量。

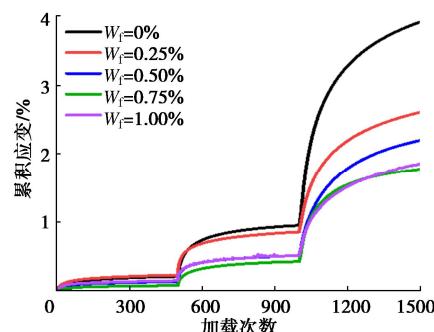


图 4 不同纤维掺量下 FCIT 的累积应变随振动次数的变化

Fig. 4 Variation of cumulative strain of FCIT with vibration times under different fiber contents

3.2 修正平移相加法

梅慧浩等^[26]通过赋予倍数系数来修正逐级加载下的累积应变, 可有效预测持续加载下的累积应变。同时通过将预测的累积应变分为幂函数曲线和线性直线进行处理, 以达到更精确预测的目的。

从逐级加载试验中可知, 试样的加载级数越多, 应力历史对试样的压密效果越显著, 导致试样在一级加载作用下的累积应变与持续加载下的累积应变差异越大, 尤其是随着动应力幅值的增加, 差异化加剧。因此通过将每级加载下的累积应变值乘以倍数系数来尽可能消除该差异。假设试样经历了动应力幅值增大的逐级加载, 每级加载的动应力幅值分别为 σ_{d1} , σ_{d2} , σ_{d3} , ..., σ_{di} , 每级加载结束后的振动次数为 N_1 , N_2 , N_3 , ..., N_i 。具体步骤如下:

(1) 首先将振动次数在 (N_1, N_2) 范围内的累积应变曲线 B 平移到以原点为起点的曲线 B' , 然后将 σ_{d1} 振动作用下的累积应变曲线 A 和曲线 B' 相加再乘以倍数系数 ζ_1 , 得到累积应变曲线 B'' ($B'' = \zeta_1(A + B')$), 即 σ_{d2} 振动作用下在振动次数 $(0, N_1)$ 范围内累积应变曲线。

(2) 其次对于 σ_{d2} 加载 N_1 后的估算值, 认为其变化趋势应随着振动次数呈线性发展, 该直线斜率 θ 取 σ_{d2} 加载实测值最后阶段性变化的角度。

(3) 同样, 将振动次数在 (N_2, N_3) 范围内的累积应变曲线 C 平移到以原点为起点的曲线 C' , 然后将 σ_{d1} 振动作用下的累积应变曲线 B'' 和曲线 C' 相加再乘以倍数系数 ζ_2 , 得到累积应变曲线 C'' ($C'' = \zeta_2(B'' + C')$), 即 σ_{d3} 振动作用下在振动次数 $(0, N_1)$ 范围内累积应变曲线, 如图 5。

(4) 根据 σ_{d3} 加载实测值最后阶段性变化的角度估算出 σ_{d3} 加载 N_1 后的估算值。

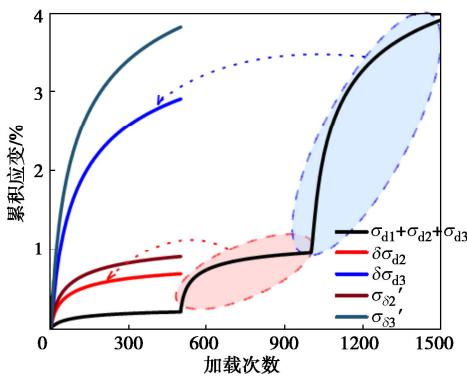


图 5 修正平移相加法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of modified translation addition

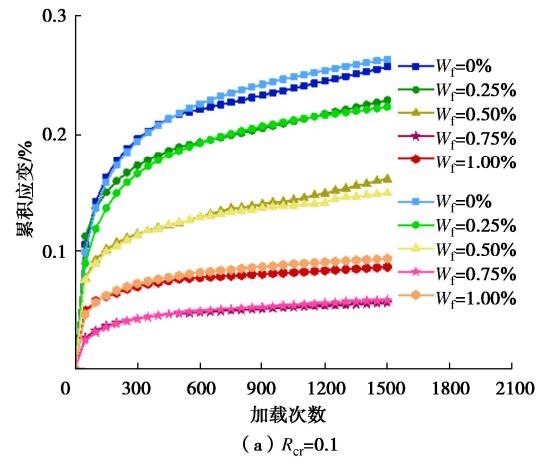
利用上述方法仅可预测在振动次数为 $(0, N_1)$ 范围内 FCIT 的累积应变发展规律, 且平移相加法认为曲线 B , C 在最后 100 个振动次数内的累积应变随振

动次数呈线性关系。利用改进的方法, 倍数系数 ζ 满足式:

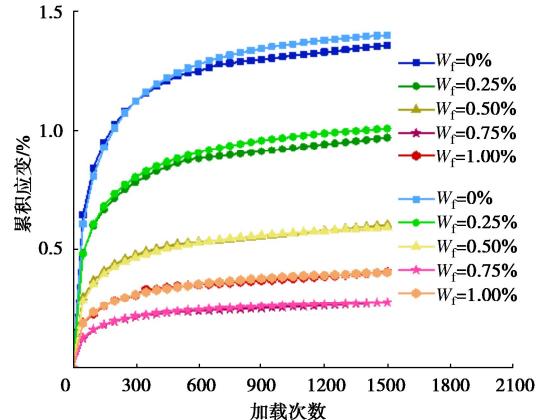
$$\zeta_{(7d)} = 0.91 - 0.18 \ln(R_{cr}) - 0.41 W_f, R^2 = 0.84 \quad (1)$$

根据上述修正平移法的步骤得到如图 6 所示的累积应变曲线对比图。图中 W'_f 和 W_f 分别为修正后和实际的 FCIT 累积应变曲线。可以发现预测效果较好, 说明修正平移相加法适用于通过逐级加载测试数据, 预测持续加载下的 FCIT 累积应变。修正后的预测累积应变曲线满足下式:

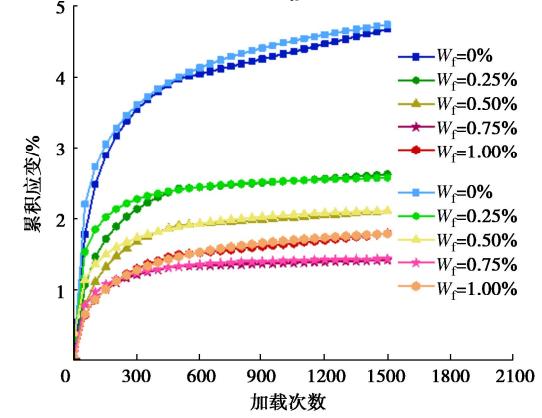
$$\varepsilon_p = mN_1^n + cN_2 + d \quad (N_1 \leq 500; N_2 \geq 500) \quad (2)$$



(a) $R_{cr}=0.1$



(b) $R_{cr}=0.2$



(c) $R_{cr}=0.3$

图 6 修正平移后的预测累积应变与实际累积应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of predicted cumulative strain after correction and translation with actual cumulative strain curve

4 结 论

采用动三轴试验研究了在不同加载模式下 FCIT 随纤维掺量和动静比变化的变形情况。研究成果可为 FCIT 应用于路基以及预防沉降和延缓路基变形提供参考。主要得到以下 3 点结论。

(1) 根据安定理论划分了 FCIT 在间歇加载和逐级加载下的变形行为, 发现了 FCIT 在 7 d 龄期时均处于塑性安定和塑性蠕变状态。

(2) 通过间歇加载和持续加载作用下 FCIT 变形的对比, 发现了间歇加载下的累积应变变化幅度总体上小于持续加载作用引起的累积应变变化幅度。

(3) 逐级加载下的累积应变经过修正平移相加法, 可较好预测持续加载下的累积应变, 修正后的累积应变满足幂函数和线性函数组成的预测公式, 从而降低了试验时间和材料消耗。

参 考 文 献:

- [1] SÁ T, ODA S, BALTHAR V, et al. Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure[J]. Construction and Building Materials, 2022, **342**: 128072.
- [2] BASTOS L, SILVA G, MENDES J, et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, **28**: 04016102.
- [3] LI N, LV S, WANG W, et al. Experimental investigations on the mechanical behavior of iron tailings powder with compound admixture of cement and nano-clay[J]. Construction and Building Materials, 2020, **254**: 119259.
- [4] 姜屏, 杨建冬, 李娜, 等. 纤维改性水泥稳定铁尾矿砂的无侧限抗压性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(8): 73-79. (JIANG Ping, YANG Jiandong, LI Na, et al. Unconfined compressive properties of fiber modified cement stabilized iron tailings[J]. Composites science and engineering, 2021(8): 73-79. (In Chinese))
- [5] JIANG P, LV S, WANG Y, et al. Investigation on direct shear and energy dissipation characteristics of iron tailings powder reinforced by polypropylene fiber[J]. Applied Sciences, 2019, **9**(23): 2076-3417.
- [6] JIANG P, QIAN J, LI N. Reliability analysis of a direct shear test of modified iron tailings based on the monte carlo algorithm[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-11.
- [7] XIAO H, ZHANG N, LI G, et al. Graphene-iron ore tailings-based cementitious composites with high early flexural strength[J]. Materials, 2022, **16**: 327.
- [8] HUANG D, SUN R, WEI S, et al. Research on mechanical properties of cement mortar with iron tailings[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **3512**: 169-172.
- [9] YANG L, XU F. Experimental study on the effect of fine powder in iron tailings on the durability of ordinary dry mixed mortar[J]. Integrated Ferroelectrics, 2021, **213**(1): 1-11.
- [10] JI X, ENYONG S, SUN Y, et al. Study on crack resistance of cement-stabilized iron tailings[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022: 1-14.
- [11] 孟凡丽, 娄桢桢, 葛威. 长期循环荷载下卸荷粉土动力特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(增刊 1): 383-388. (MENG Fanli, LOU Zhenzhen, GE Wei. Experimental study on dynamic characters of unloading silt under long-term cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(S1): 383-388. (in Chinese))
- [12] JIANG P, CHEN Y, LI N, et al. Cumulative deformation and damage evolution of fiber cement-modified iron tailings under cyclic load[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, **23**(4): 04023004.
- [13] 何绍衡, 刘志军, 夏唐代, 等. 长期循环荷载下珊瑚砂累积变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 161-164. (HE Shaoheng, LIU Zhijun, Xia Tangdai, et al. Experimental study on cumulative deformation characteristics of coral sand under long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering., 2019, **41**(S2): 161-164. (in Chinese))
- [14] CHEN C, ZHOU Z, KONG L-W, et al. Undrained dynamic behaviour of peaty organic soil under long-term cyclic loading, Part I: Experimental investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **107**: 279-291.
- [15] YAFENG L, NIE R-S, YUE Z, et al. Dynamic behaviors of fine-grained subgrade soil under single-stage and multi-stage intermittent cyclic loading: Permanent deformation and its prediction model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **142**: 106548.
- [16] NIE R, MEI H, LENG W, et al. Characterization of permanent deformation of fine-grained subgrade soil under intermittent loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **139**: 106395.
- [17] LI Y F, NIE R S, LI Y J, et al. Cumulative plastic deformation of subgrade fine-grained soil under intermittent cyclic loading and its prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**: 1065-1077.

- [18] 聂如松, 李亚峰, 冷伍明, 等. 列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(4): 828-841. (NIE Rusong, LI Yafeng, LENG Wuming, et al. Plastic deformation and critical dynamic stress of fine-grained soils under intermittent loading of trains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(4): 828-841. (in Chinese))
- [19] 李亚峰, 聂如松, 冷伍明, 等. 间歇性循环荷载作用下细粒土的变形特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, **54**(11): 2109-2119. (LI Yafeng, NIE Rusong, LENG Wuming, et al. Deformation characteristics of fine-grained soil under cyclic dynamic loading with intermittence[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, **54**(11): 2109-2119. (in Chinese))
- [20] 黄娟, 彭立敏, 袁铁映, 等. 分级加载条件下泥炭质土滞回曲线演化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, **49**(7): 1753-1759. (HUANG Juan, PENG Limin, YUAN Tieying, et al. Experimental study on evolution law of hysteretic curves of peaty soil under stepped axial cyclic loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, **49**(7): 1753-1759. (in Chinese))
- [21] ASEFZADEH A, HASHEMIAN L, BAYAT A. Characterization of permanent deformation behavior of silty sand subgrade soil under repeated load triaxial tests[J]. Transportation Research Record, 2017, **2641**(1): 103-110.
- [22] GU F, ZHANG Y, LUO X, et al. Characterization and prediction of permanent deformation properties of unbound granular materials for Pavement ME Design[J]. Construction and Building Materials, 2017, **155**: 584-592.
- [23] XIAO Y, ZHENG K, CHEN L, et al. Shakedown analysis of cyclic plastic deformation characteristics of unbound granular materials under moving wheel loads[J]. Construction and Building Materials, 2018, **167**: 457-472.
- [24] CAI Y, TANG X, LIN L, et al. Strain rate response of damage accumulation of marble under fatigue loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**: 827-836.
- [25] WANG K, ZHUANG Y. Characterizing the permanent deformation Response-Behavior of subgrade material under cyclic loading based on the shakedown theory[J]. Construction and Building Materials, 2021, **311**: 125325.
- [26] 梅慧浩, 聂如松, 冷伍明, 等. 考虑时间间歇效应的粉土永久变形特性单级和分级加载动三轴试验研究[J]. 铁道学报, 2021, **43**(12): 94-104. (MEI Huihao, NIE Rusong, LENG Wuming, et al. Characterisation of permanent deformation behaviour of silt by using both single-stage and multi-stage repeated load triaxial tests considering time intermittent effect[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, **43**(12): 94-104. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)